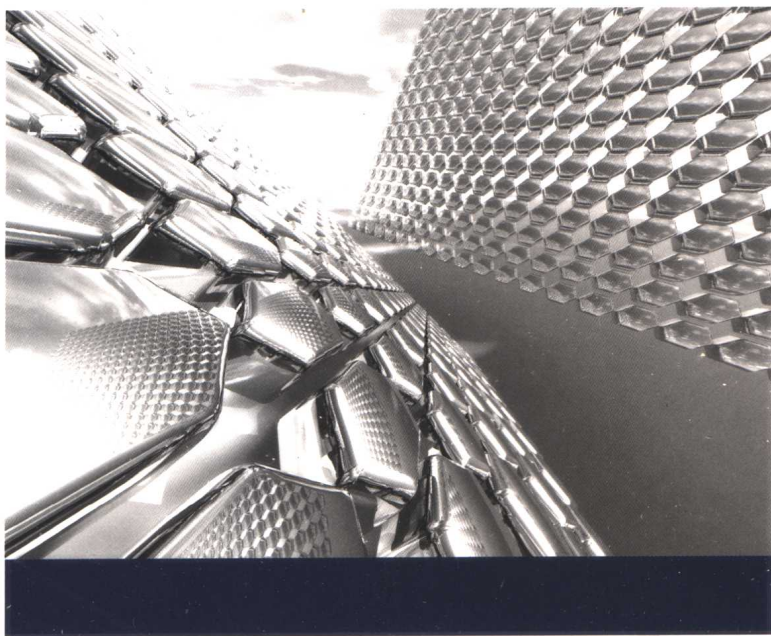


王正品 张路 要玉宏 主编

金属功能材料



Chemical Industry Press



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

金属功能材料

王正品 张路 要玉宏 主编



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

金属功能材料/王正品, 张路, 要玉宏主编. —北京:
化学工业出版社, 2004.3

ISBN 7-5025-5264-2

I. 金… II. ①王…②张…③要… III. 金属材料:
功能材料 IV. TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 012591 号

金属功能材料

王正品 张路 要玉宏 主编

责任编辑: 丁尚林

文字编辑: 余德华

责任校对: 王素芹

封面设计: 潘峰

*

化学工业出版社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

聚鑫印刷责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 720 毫米×1000 毫米 1/16 印张 18 $\frac{3}{4}$ 字数 324 千字

2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5264-2/TQ·1934

定 价: 40.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆

前 言

◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆

功能材料是指具有优良的物理、化学和生物或其相互转化的功能，用于非承载目的的材料。功能材料是能源、计算机、通讯、电子、激光等现代科学的基础，在未来的社会发展中具有重大的战略意义。近年来，功能材料发展迅速，已有几十大类，10 万多种品种，且每年都有大量新品种问世。

功能材料是一门新的学科，是目前材料领域发展最快的新领域。功能材料的结构与性能之间存在着密切联系，研究功能材料的结构与功能之间的关系，可以指导开发更为先进、新颖的功能材料。

不同种类的功能材料各具特色，本书将对金属功能材料进行重点介绍。金属功能材料是开发较早的功能材料，随着高新技术的发展，一方面促进了非金属材料的迅速发展，另一方面也促进了金属材料的发展，许多有别于传统金属材料的新型金属功能材料应运而生，有的已被广泛应用，有的正在研究中，具有广泛的应用前景。

本书由王正品、张路、要玉宏主编，其中第 1~3 章由王正品执笔，第 4 章由要玉宏执笔，第 5 章由常虎执笔，第 6 章由刘志学执笔，第 7、8 章由张路执笔，第 9 章由耿波执笔，第 10 章由高巍执笔，第 11 章由上官晓峰、要玉宏执笔。

本书编写过程中参考了大量文献，见每章后列出的主要参考文献，谨此对中外科学工作者表示衷心感谢。如有疏漏，敬请包涵。

由于编者水平所限，加之时间仓促，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2003 年 11 月于西安工业学院

第 1 章 绪论	1
1.1 功能材料的发展和分类	1
1.1.1 功能材料的发展概况	1
1.1.2 功能材料的分类和特征	2
1.2 功能材料的现状和展望	3
参考文献	7
 第 2 章 贮氢合金	9
2.1 金属贮氢原理	9
2.1.1 贮氢合金的化学和热力学原理	9
2.1.2 贮氢合金的电化学原理	11
2.1.3 合金的吸氢反应机理	14
2.2 金属氢化物贮氢材料应具备的条件	15
2.3 贮氢合金分类及开发现状	15
2.3.1 AB_5 型稀土类及钙系贮氢合金	16
2.3.2 AB_2 型 Laves 相贮氢合金	21
2.3.3 AB 型钛系贮氢合金	22
2.3.4 A_2B 型镁系贮氢合金	24
2.4 金属贮氢材料的应用	25
2.4.1 在电池上的应用	25
2.4.2 在能量转换技术中的应用	27
参考文献	35
 第 3 章 梯度功能材料	37
3.1 梯度功能材料的概念	37
3.2 热防护梯度功能材料	38
3.2.1 热防护梯度功能材料原理的设计	38
3.2.2 热防护梯度功能材料的种类和制备方法	39
3.2.3 热防护梯度功能材料的特性评价	43
3.3 梯度功能材料的应用	43

3.4 梯度功能材料的展望	44
3.4.1 热防护梯度功能材料的研究方向	44
3.4.2 梯度功能材料的品种	45
3.4.3 梯度功能材料的应用领域	46
参考文献	47
 第4章 磁性材料	 49
4.1 磁性的基本知识	49
4.1.1 物质的磁性	49
4.1.2 铁磁物质的特性	54
4.1.3 铁磁物质的自发磁化和磁畴的形成	56
4.1.4 磁致伸缩和磁弹性能	57
4.2 金属磁性材料的种类和特性	57
4.2.1 金属软磁材料	58
4.2.2 非晶态软磁合金	66
4.2.3 金属硬磁材料	76
4.3 金属磁性材料磁性能的测试	82
4.3.1 磁性材料静态磁性能的检验和测量	83
4.3.2 磁性材料动态磁性的检验和测量	98
4.3.3 软磁材料损耗的测量	104
4.3.4 材料磁性的自动测量	107
4.3.5 基于微机技术的磁性能测量装置	112
参考文献	114
 第5章 金属薄膜材料	 116
5.1 金属薄膜的形成及其结构	116
5.2 金属薄膜的结构缺陷	119
5.2.1 点缺陷	119
5.2.2 位错	121
5.3 金属薄膜中的光等离子体共振性	123
5.3.1 光学常数和其它物理常数	123
5.3.2 金属内电子的等离子体振动	123
5.3.3 道尔徳方程式和复介电常数	124
5.3.4 表面等离子体	125
5.3.5 金属薄膜中的光等离子体	125

5.4 金属薄膜的超导性能	128
5.5 金属薄膜的磁性能	131
5.5.1 金属薄膜的磁性	131
5.5.2 磁各向异性	131
5.5.3 金属薄膜的畴壁	132
5.5.4 金属薄膜制备条件对磁性能的影响	135
参考文献	137
第6章 环境材料	138
6.1 环境材料的研究和发展	138
6.1.1 环境材料的研究内容	139
6.1.2 环境材料的研究现状及发展趋势	139
6.2 环境材料的设计	140
6.2.1 材料产业的可持续发展	140
6.2.2 工业生态学	142
6.2.3 材料流理论	143
6.2.4 金属材料生态设计	144
6.3 环境材料的评价标准与方法	147
6.3.1 环境材料的评价标准	147
6.3.2 生命周期评价方法	150
6.4 金属材料的生态化改造	154
6.4.1 熔融还原炼铁技术	154
6.4.2 冶金短流程工艺	154
6.4.3 金属材料的近终形加工	155
6.4.4 金属材料制品的喷射成形	156
6.4.5 金属材料表面优化	157
6.5 金属环境材料	158
6.5.1 高性能长寿命金属材料	158
6.5.2 高速钢废料的综合利用	161
6.5.3 含锌冶金工业废弃粉尘的零排放	164
6.5.4 合金铝的零废弃	164
6.5.5 金属废料的再生化	165
6.5.6 钒渣的高附加值利用	165
参考文献	166
第7章 纳米金属材料	167

7.1 纳米材料及其应用	167
7.1.1 纳米及纳米技术的概念	167
7.1.2 纳米材料学	168
7.1.3 纳米材料的应用	170
7.2 纳米结构单元	173
7.2.1 原子团簇	173
7.2.2 纳米微粒	174
7.2.3 人造原子	175
7.2.4 纳米管、纳米棒、纳米丝和同轴纳米电缆	176
7.3 纳米金属材料的性能及制备方法	177
7.3.1 纳米金属材料的性能	178
7.3.2 纳米金属的制备方法	183
7.4 纳米金属材料的应用及发展	184
7.4.1 纳米金属材料的应用	184
7.4.2 纳米金属材料的研究现状	187
7.4.3 纳米金属材料的发展及挑战	189
参考文献	190

第8章 非晶态金属材料

8.1 非晶态金属的发展历史	192
8.1.1 非晶态金属的发展简史	192
8.1.2 我国非晶态金属材料的发展现状	194
8.1.3 非晶态金属材料的发展前景展望	196
8.2 非晶态金属的结构特点	197
8.2.1 非晶态金属的结构	197
8.2.2 非晶态的结构模型	199
8.3 非晶态金属的制备	200
8.3.1 非晶态金属的制备方法	201
8.3.2 影响非晶态合金形成的几个因素	202
8.4 非晶态金属性能特点及应用	203
8.4.1 磁学性能	203
8.4.2 力学性能	205
8.4.3 化学性能	206
8.4.4 光学性能	208
参考文献	209

第 9 章 信息材料	210
9.1 磁信息材料	210
9.1.1 磁记录技术与原理	210
9.1.2 磁记录介质材料	214
9.1.3 高密度磁性存储磁头材料	222
9.1.4 磁信息材料的进展	223
9.2 高密度光存储材料	225
9.2.1 高密度光存储材料的记录和读出原理	226
9.2.2 光盘存储技术的发展趋势及对材料的要求	227
9.2.3 高密度光盘存储材料	229
9.2.4 超高密度超快速光存储的主要发展方向	232
参考文献	233
 第 10 章 超导材料	 234
10.1 超导现象及超导材料的基本性质	234
10.1.1 超导体的基本物理现象	234
10.1.2 超导体的临界参数	235
10.1.3 两类超导体	237
10.1.4 超导体的理论基础和微观机制	238
10.1.5 超导隧道效应	241
10.2 超导材料的分类及性能	242
10.2.1 低温超导体	242
10.2.2 高温超导体	244
10.3 超导材料的应用	245
10.3.1 能源领域的应用	246
10.3.2 交通领域的应用	246
10.3.3 电子信息领域的应用	247
10.3.4 军事领域的应用	248
参考文献	249
 第 11 章 智能金属材料	 250
11.1 智能材料概述	250
11.2 金属系智能材料及形状记忆合金	253
11.2.1 金属系智能材料	253
11.2.2 形状记忆合金	254

11.2.3 形状记忆合金的用途	278
11.3 新一代智能材料及 Ni-Mn-Ga 磁控形状记忆合金	283
11.3.1 稀土超磁致伸缩材料	283
11.3.2 Ni-Mn-Ga 磁控形状记忆合金	285
11.4 智能材料在未来的应用	286
参考文献	288
附录	289

第1章 绪论

1.1 功能材料的发展和分类

1.1.1 功能材料的发展概况

材料与能源、信息并列为现代科学技术的三大支柱，材料的使用和发展标志着一个国家科技和经济的发展水平。

材料的发展虽然历史悠久，但作为一门独立的学科是从20世纪60年代才开始的。材料的研究和制造开始从经验、定性和宏观向理论、定量和微观发展。20世纪70年代，美国学者首先提出材料科学与工程（materials science and engineering）这个学科全称，定义材料科学与工程是关于材料成分、结构、工艺与它们的性能和用途之间的有关知识的开发和应用的科学，并提出了四面体模型，如图1-1所示。

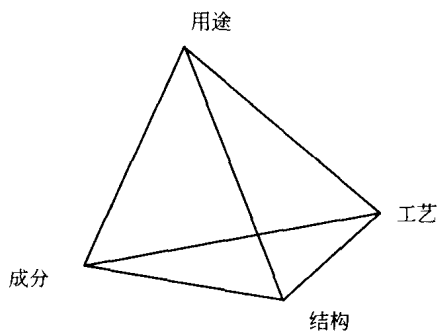


图 1-1 四面体模型

材料一般分成结构材料（structural materials）和功能材料（functional materials）两大类。结构材料是指能承受外加载荷而保持其形状和结构稳定的材料，它具有优良的力学性能，在物件中起着“力能”的作用。功能材料是指具有一种或几种特定功能的材料，它具有优良的物理、

化学和生物功能，在物件中起着“功能”的作用。

功能材料的概念是由美国贝尔研究所 J. A. Morton 博士在 1965 年首先提出来的，但人类对功能材料的研究和应用远早于 1965 年，只是它的品种和产量很少，且在相当一段时间内发展缓慢。20 世纪 60 年代以来，各种现代技术如微电子、激光、红外、光电、空间、能源、计算机、机器人、信息、生物和医学等技术的兴起，强烈刺激了功能材料的发展。同时，由于固体物理、固体化学、量子理论、结构化学、生物物理和生物化学等学科的飞速发展以及各种制备功能材料的新技术和现代分析测试技术在功能材料研究和生产中的实际应用，许多新的功能材料不仅已在实验室中研制出来，而且已批量生产和投入使用。现代科学技术的迅猛发展，使得适应高技术的各种新型功能材料如雨后春笋，不断涌现，它们赋予高技术以新的内涵，促进了高技术的发展和应用的实现。

1.1.2 功能材料的分类和特征

功能材料是指具有优良的物理、化学和生物或其相互转化的功能，用于非承载目的的材料。功能材料的种类繁多，为了研究、生产和应用的方便，常把它进行分类。由于着眼点不同，分类的方法也不同，目前主要有以下六种分类方法。

① 按用途分类 分为电子、航空、航天、兵工、建筑、医药、包装等材料。

② 按化学成分分类 分为金属、无机非金属、有机、高分子和复合材料。

③ 按聚集态分类 分为气态、液态、固态、液晶态和混合态功能材料。其中，固态又分为晶态、准晶态和非晶态。

④ 按功能分类 分为物理（如光、电、磁、声、热等）、化学（如感光、催化、含能、降解等）、生物（如生物医药、生物模拟、仿生等）和核功能材料。

⑤ 按材料形态分类 分为体积、膜、纤维和颗粒等功能材料。

⑥ 按维度分类 分为三维、二维、一维和零维功能材料。三维材料即固态体相材料。二维、一维和零维材料分别为其厚度、直径和粒度小到纳米量级的薄膜、纤维和微粒，统称为低维材料，其主要特征是具有量子化效应。

功能材料与结构材料相比,具有以下主要特征。

① 功能材料的功能对应于材料的微观结构和微观物体的运动,这是最本质的特征。

② 功能材料的聚集态和形态非常多样化,除了晶态外,还有气态、液态、液晶态、非晶态、准晶态、混合态和等离子态等。除了三维体相材料外,还有二维、一维和零维材料。除了平衡态外,还有非平衡态。

③ 结构材料常以材料形式为最终产品,而功能材料有相当一部分是以元件形式为最终产品,即材料元件一体化。

④ 功能材料是利用现代科学技术,多学科交叉的知识密集型产物。

⑤ 功能材料的制备技术不同于结构材料用的传统技术,而是采用许多先进的新工艺和新技术,如急冷、超净、超微、超纯、薄膜化、集成化、微型化、密集化、智能化以及精细控制和检测技术。

1.2 功能材料的现状和展望

当前功能材料研究和开发的热点集中在光电子信息材料、功能陶瓷材料、能源材料、生物医用材料、超导材料、功能高分子材料、先进复合材料、智能材料以及生态环境材料等领域。

(1) 电子信息材料

光电子材料是指光电子技术中所需用的材料,它对于满足计算机、通讯、国防、航天工业等领域的应用至关重要。在现代科学技术的发展中,电子学和光子学已形成交叉共生的发展关系。光电子技术是现代信息科学技术的重要组成部分,信息的传递可由光子负担,而信息的产生、处理、检测、存储和显示等功能则由光子和电子联合来完成。光电子信息系统包括光载波源、光控制与信号加载、光信号传输、处理和接收(检测和显示),所需要的光电子器件材料多种多样,从无机物到有机物,从单晶到非晶态,从半导体到绝缘体,可达几十种之多。

(2) 生物医用材料

作为生物体部分功能或形态修复的材料称为生物医用材料,简称生物材料(biomaterials)。生物医用材料对于挽救生命、救治伤残和提高人类的生活质量具有重要的实际意义和巨大的社会效益。随着生物科学技术的发展,人类物质文明的提高以及进入老龄化的社会,对生物医用材料及其

制品的需求必将逐年增加。作为高技术重要组成部分的生物医用材料已进入一个快速发展的新阶段。与之相应，一个新兴的生物材料产业正在兴起。

由于生物医用材料是与生物活体组织联系或植入活体内起某种生物功能，因此，生物医用材料主要包括三个方面：一是硬组织的替代材料，如人骨、人工牙齿、齿或骨的修复材料；二是埋入生物体内部的植入材料，如人工心脏瓣膜、人工血管、人工肾等医用高分子材料；三是作为药物定位的载体，控制药物的释放，使之长效平和。为此要求生物医用材料必须具有良好的生物功能性和生物相容性。所谓生物功能性，是指生物材料具有在其植入位置上行使功能所需的物理和化学性质；生物相容性则是指一种生物材料在特殊应用中和宿主反应起作用的能力。目前对生物相容性的理解，已不仅仅是要求材料植入后不会引起毒性反应，更要求植入材料和机体之间的相互作用能被永久地协调好。

（3）能源材料

能源是人类社会生存与发展的重要物质基础，是现代文明的三大支柱之一。能源材料是指那些正在发展的，可能支撑新能源体系的建立，满足各种新能源及节能新技术所要求的一类材料。按使用目的可分为新能源材料、节能材料和贮能材料。

太阳能电池材料是新能源材料研究开发的热点，目前最有希望大量应用的是硅太阳能电池，单晶硅光电池光电转换效率高，但材料价格较贵。多晶硅光电池效率达 13%，半导体 GaAs 的转换效率可达 20%~28%。采用多层复合结构，通过选择性吸收涂层和光谱转换涂层可进一步提高转换效率。

氢能是人类未来的理想能源，资源丰富，干净，无污染。氢能利用的关键是氢的制备技术和高密度的安全贮运。在贮氢材料中，人们对贮氢合金进行了系统研究，目前具有实用价值的贮氢合金材料主要有稀土系列、钛铁系列、钛锰系列等。我国稀土资源丰富，开发混合稀土系列贮氢合金材料及其应用工程技术具有广阔的发展前景。

固体氧化物燃料电池（SOFC）的研究也较为活跃，关键是电池材料。例如固体氧化物燃料电池（SOFC）用的固体电解质薄膜和电池阴极材料，质子交换膜型燃料电池（PEMFC）用的有机质子交换膜等，都是目前研究的热点课题。

(4) 生态环境材料

随着现代社会和工业的快速发展,资源和能源的消耗急剧增加,大量废弃物及有害物的排除,使人类生活的周围环境和地球环境日益恶化。许多科学家预言,环境问题将是21世纪人类面临的最大危机和最严峻的挑战之一。正因为如此,大力发展生态环境材料,开展材料的环境协调性评估,发展零排放和零废弃的新材料技术,实现材料的综合利用,已成为越来越多的国家关注的焦点。

所谓生态环境材料(ecomaterials),是指那些具有良好的使用性能或功能,并且能够和环境相协调的材料。生态环境材料是20世纪90年代在国际高技术新材料研究中形成的一个新领域。这类材料消耗的资源 and 能源少,对生态和环境污染小,再生利用率高。从材料的制造、使用、废弃直至再生循环利用的整个寿命过程,都与生态环境相协调。因此,生态环境材料不是指某一具体的新材料,而是指那些考虑到资源和环境问题的新材料的总称。

生态环境材料研究的主要内容包括:

① 直接面临的与环境问题相关的材料技术,例如,生物可降解材料技术,CO₂气体的固化技术,SO_x、NO_x催化转化技术,废物的再资源化技术,环境污染修复技术,材料制备加工中的洁净技术以及节省资源、节省能源的技术;

② 开发能使经济可持续发展的环境协调性材料,例如,仿生材料,环境保护材料,氟里昂、石棉等有害物质的替代材料,绿色新材料等;

③ 材料的环境协调性评价,主要采用寿命全程评价(LCA)法。

(5) 智能材料

智能材料(intelligent materials,简称为IM)是能够感知环境变化并通过自我判断得出结论执行相应指令的材料,它是继天然材料、合成高分子材料、人工设计材料之后的第四代材料,是现代高技术新材料发展的重要方向之一,将支撑未来高新技术的发展,使传统意义上的功能材料和结构材料之间的界限逐渐消失,实现结构功能化,功能多样化。因此,科学家们预言智能材料的研制成功和大规模应用将导致材料科学发展的又一次重大革命。

智能材料系统和结构集传感、控制和驱动(执行)等功能于一体,它能适时地感知与响应外界环境的变化,做出判断,发出指令,并执行和完

成动作,在高水平上实现自我检测、自诊断、自监控、自修复及自适应等多种功能。目前研究开发的智能材料系统和结构的主要材料有形状记忆材料、压电材料、电(磁)致伸缩材料、光纤和电流变体、磁流变体等。利用这些机敏材料的功能,通过多种材料组元的功能复合和仿生设计,将智能属性“注入”材料系统的宏观和微观结构中,得到传感、控制和驱动于一体的智能材料系统和结构。

智能材料的内涵极为广泛,涉及的材料从无机到有机,结构层次从宏观(如大型工程构件)到微观(如纳米组装材料)。其研究与开发涉及到物理、化学、力学、电子学、计算机科学、仿生学、生命科学和控制论等,极大地促进了材料科学技术和信息科学技术、生物工程技术等的交叉渗透和融合,在国民经济各部门特别是高技术领域里具有重要的作用。例如,在航天航空飞行器、空间平台系统、核反应堆、桥梁、大坝、海底工程、高层民用建筑等大型重要工程结构系统中,能够在线“感觉”自身的负载以及所受应力、振动、冲击、温度、损伤等状况,进行主动和动态的监测与控制,通过自适应调整和自我修复等方式,消除隐患,提高安全性和可靠性,利用智能材料制造的飞机机翼可以自己弯曲、自动改变形状,有效地调整升力或阻力,不仅可以减轻飞机的质量,还能提高飞机(特别是战斗机)的适应性和存活率。在船舶设计制造方面,一种随外界压力变化而改变自身弹性的智能材料可用于潜水艇的设计中,这种潜水艇即使在深海高压下仍能保持其刚性。又如,具有自我调节功能的汽车悬架可以识别路面的变化,并相应改变自身的刚度,提高乘坐的舒适性和安全感。利用变色材料制成的电致变色智能窗,可使办公室节省电能达40%。

尽管目前在智能材料研究中所取得的进展与人们所期待的真正意义上的“智能”还有很大的差距,但是,短短10年来,智能材料的研究和开发取得了许多有意义的成果。

展望21世纪,高新技术会更加迅猛地发展,对功能材料的需求也会日益迫切。由于功能材料具有各种奇特的功能,其发展潜力是巨大的,随着科学技术的发展,必将会有更多的新型功能材料出现。从国内外功能材料的研究动态看,功能材料的发展可归纳如下。

① 开发高技术所需的新型功能材料,特别是尖端领域(如航空航天、分子电子学、高速信息、新能源、海洋技术和生命科学等)所需和在极端条件(如超高压、超高温、超低温、高烧蚀、高热冲击、强腐蚀、高真

空、强激光、高辐射、粒子云、原子氧、核爆炸等)下工作的高性能功能材料。

② 功能材料的功能由单功能向多功能和复合或综合功能发展,从低级功能(如单一的物理功能)向高级功能(如人工智能、生物功能和生命功能等)发展。

③ 功能材料和器件的一体化、高集成化、超微细化、高密集化和超分子化。

④ 功能材料和结构材料兼容,即功能材料结构化,结构材料功能化。

⑤ 进一步研究和发展功能材料的新概念、新设计和新工艺。已提出的新概念有梯度化、低维化、智能化、非平衡态、分子组装、杂化、超分子化等;已提出的新设计有化学模式识别设计、分子设计、非平衡态设计、量子化学和统计力学计算法等,这些新设计方法都要采用计算机辅助设计,要求建立数据库和计算机专家系统;已提出的新工艺有激光加工、离子注入、等离子技术、分子束外延、电子和离子束沉积、固相外延、精细刻蚀、生物技术及在特定条件下(如高温、高压、低温、高真空、微重力、强电磁场、强辐射、急冷和超净等)的工艺技术。

⑥ 完善和发展功能材料检测和评价的方法。

⑦ 加强功能材料的应用研究,扩展功能材料的应用领域,特别是尖端领域和民用高技术领域,并把成熟的研究成果迅速推广,以形成生产力。

参 考 文 献

- 1 贡长生, 张克立. 新型功能材料. 北京: 化学工业出版社, 2001
- 2 周馨我. 功能材料学. 北京: 北京理工大学出版社, 2000
- 3 郭卫红, 汪济奎. 现代功能材料及其应用. 北京: 化学工业出版社, 2002
- 4 干福熹. 信息材料. 天津: 天津大学出版社, 2000
- 5 赵连城, 蔡伟, 郑玉峰. 合金的形状记忆效应与超弹性. 北京: 国防工业出版社, 2002
- 6 姚康德, 成国祥. 智能材料. 北京: 化学工业出版社, 2002
- 7 殷景华, 王雅珍, 鞠刚. 功能材料概论. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999
- 8 《功能材料及其应用手册》编写组. 功能材料及其应用手册. 北京: 机械工业出版社, 1991
- 9 刘光华, 吴华彬, 刘捷. 材料导报, 1996, (3): 46
- 10 张勇, 王民权. 材料导报, 1996, (4): 8
- 11 齐亚范. 材料导报, 1996, (3): 30
- 12 国家高技术新材料领域专家委员会. 材料导报, 1999, 13 (1): 1